

На правах рукописи

Храмченкова Резида Хавиловна

**Физико-структурные характеристики почвы и их влияние
на энерго-массообмен между почвой и нижней
атмосферой**

25.00.29 – Физика атмосферы и гидросферы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Казань – 2006

Работа выполнена в Научно-исследовательском институте математики и механики им. Н. Г. Чеботарева Казанского государственного университета

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
доцент Чекалин Анатолий Николаевич

Научный консультант: доктор физико-математических наук,
профессор Фахрутдинова Антонина Николаевна

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
доцент Овчинников Марат Николаевич
доктор физико-математических наук,
профессор Якимов Николай Дмитриевич

Ведущая организация – Институт экологического почвоведения МГУ им
М. В. Ломоносова

Защита состоится « 29 » июня 2006 г. в 14.30 часов в ауд. 210 физического факультета на заседании диссертационного совета Д 212.081.18 в Казанском государственном университете по адресу: 420008, Казань, ул. Кремлевская, 18

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанского государственного университета

Автореферат разослан 25 мая 2006 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета

доктор физико-математических наук,
профессор



А. В. Карпов

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Почва является зоной контакта трех важнейших сфер Земли – атмосферы, гидросферы и литосферы, что предопределяет специфику почвы как физической системы. Одним из главных компонентов этой системы является почвенная влага. Ее накопление и динамика определяются как взаимодействием с атмосферой, так и с подземными и поверхностными водами. Это позволяет рассматривать почвенную влагу как особую составляющую гидросферы Земли, причем ее свойства и движение обусловлены действием специфических сил, главным образом со стороны поверхности почвенных частиц. Специфика почвенной влаги проявляется и в том, что ее движение происходит в двух формах – форме пара и в конденсированном состоянии. Эти проблемы являются объектом исследования многих научных дисциплин, поэтому в последнее время все более остро встает вопрос о выработке единого описания накопленных знаний. Таким описанием может служить представление накопленных знаний в виде математических закономерностей.

Разработка математических моделей протекающих процессов позволяет с единых теоретико-экспериментальных позиций рассматривать вклад того или иного явления в процесс в целом. Кроме того, математическая модель позволяет выработать количественные рекомендации по предотвращению негативных воздействий на систему или усилению позитивных воздействий, что дает возможность подойти к выработке рациональных инженерных решений. При решении задач корректного математического описания гидроаэрофизических процессов в почвах необходимо учитывать как накопленные экспериментальные и теоретические результаты по изучаемым процессам, так и разрабатывать новые экспериментальные и теоретические подходы к дополнению и объединению таких результатов, причем с единых методологических позиций. Особую важность здесь имеет экологический аспект решаемых задач. Дело в том, что почва, как известно, является одной из важнейших составляющих биосферы. В связи с этим изучение влияния различных загрязнений на процессы, протекающие в почвах, особенности деградации почв, переноса загрязнений в почвах являются актуальными с точки зрения их влияния на все более усиливающееся загрязнение атмосферы, гидросферы и биосферы.

Интенсификация загрязнения окружающей среды в последнее время затронула в значительной мере и почвенный покров. Выбросы вредных веществ, разливы отходов химических производств, нефти и нефтепродуктов приводят к интенсивному загрязнению почвы и, как следствие, к необходимости прогноза по изменению свойств загрязненной почвы и влияния таких процессов на влаго- и теплообмен почвы и атмосферы.

Все вышесказанное позволяет сформулировать **цель работы**: изучение физико-структурных характеристик почвы и их влияния на энерго-массообмен между почвой и нижней атмосферой.

Из всего множества взаимосвязанных задач физики почв и гидрофизики атмосферы выбраны для исследования пять. Во-первых, это разработка моделей набухания почвенных частиц в зависимости от различных физических факторов (влажность, механическая нагрузка, физико-химические свойства почвы и др.). Во-вторых, массоперенос в ненасыщенных набухающих пористых средах, к каковым относятся почвы. В третьих, задачи, связанные с электрохимическими характеристиками почв. В четвертых, задачи, связанные с процессами взаимодействия органической и неорганической частей почвенной матрицы и формирования водопрочной структуры почвы. И, в пятых, задачи о влаго- и теплообмене между почвой и турбулентной атмосферой.

Первый класс задач традиционно связан с проблемами термодинамики почвенной влаги в набухающих почвах. Свойства почвенной матрицы при этом суммируются в нескольких эффективных параметрах, таких, например, как емкость катионного обмена, которые затем входят в уравнения равновесия для набухающих систем. В итоге показано, что загрязнение почв ведет к снижению одной из важнейших характеристик почвы - ее водоудерживающей способности.

Второй класс задач связан с необходимостью разработки подходов к описанию процессов массопереноса в набухающих пористых средах, к которым относятся и почвы, а также влияния механического и химического воздействия на состояние и свойства почв.

Третий класс задач связан с проблемой влияния различных факторов, включая загрязнение почвы, на изменение важнейших характеристик почвы. Анализируются различные механизмы переноса в почвах растворов, в том числе и содержащих загрязняющие вещества, активно влияющие на динамику процес-

сов набухания и усадки в почвах, а, следовательно, и на весь комплекс физико-структурных характеристик почвы.

Четвертый класс задач связан с изучением процессов взаимодействия органической и неорганической части почвенной матрицы, в том числе процессов формирования водопрочных почвенных агрегатов, процессов растворения почвенного гумуса, влияния на эти процессы загрязнения почв, а также анализа факторов стабилизации почвенного гумуса.

Пятый класс задач связан с особенностями теплообмена и влагообмена между почвой и турбулентной атмосферой. В этих процессах существенную роль играют именно физико-структурные характеристики почвы, исследованию которых посвящены первые четыре главы настоящей работы.

Основные задачи исследования:

1. На основе методов термодинамики набухающих систем разработать модели массообмена в набухающих почвах и исследовать в рамках этих моделей влияние различных факторов на физико-структурные характеристики почвы.
2. На основе объединения методов теории массопереноса в пористых средах и методов термодинамики набухающих систем разработать модель физико-механических и физико-химических свойств почвы, позволяющую с единых позиций подойти к анализу широкого комплекса вопросов о влиянии загрязнения на важнейшие характеристики почв (реология почв, перенос и диффузия в почвах, электрохимические и буферно-емкостные свойства почв).
3. На базе методов теории массопереноса в набухающих средах разработать модель изменения важнейших транспортных характеристик почвы, связанных с протеканием процессов переноса загрязнений в почвах.
4. На базе проведенных экспериментальных исследований и теоретического анализа процесса агрегатообразования в почвах подойти к анализу основных свойств почвенных агрегатов, в том числе к свойству водопрочности, при взаимодействии неорганической и органической составляющих почвенной матрицы.
5. На основе полученных результатов разработать модели, учитывающие влияние физико-структурных характеристик почвы на энерго-массообмен почвы и турбулентной атмосферы, а также последствия изменения этих параметров.

На защиту выносятся

1. уравнения физико-химической механики почвы и оценка влияния негативно-го механического воздействия на почву;
2. модель буферных свойств почвы;
3. модель электрохимических свойств почв;
4. модель формирования водопрочной агрегатной структуры почвы;
5. модель для оценки влияния физико-структурных характеристик почвы на процесс энерго-массообмена почвы и нижней атмосферы.

Научная новизна работы

Среди новых результатов, полученных автором диссертации, наиболее значительными представляются следующие:

- построение на основе теории массопереноса в почвах и термодинамики почв модели набухания и массообмена в почвах, позволяющих оценить влияние различных факторов на водоудерживающую способность почв;
- построение модели физико-механических и физико-химических свойств набухающих пористых сред и ее приложения к почвам и процессам энерго-массообмена с атмосферой;
- построение на базе разработанной модели массообмена в почвах решения ряда задач массопереноса в почвах;
- разработка модели электрохимических свойств почв и ее связи с физико-структурными характеристиками почвы;
- разработка модели, позволяющей проследить процесс взаимодействия минеральной и органической составляющей почвенной матрицы (биокосные процессы) и его влияния на формирование структуры почвы (процесс агрегатообразования);
- разработка модели энерго-массообмена почвы и турбулентной атмосферы и влияния на этот процесс основных физико-структурных характеристик почвы

Научно-практическое значение работы

Работа носит теоретический и прикладной характер. Предложенные модели набухания почвенной матрицы и массопереноса химических примесей в пористых средах позволяют оценить влияние механического и химического воздействия на водоудерживающую способность почвы, что может быть использовано при проектировании хранилищ для химических и радиоактивных отходов, а также решении инженерных задач по обработке почвенного покрова. В результате изучения процесса взаимодействия неорганической и органической со-

ставляющей почвенной матрицы была предложена модель формирования водопропрочной структуры почвы, позволяющая теоретически рассчитать эффективный радиус водопропрочных агрегатов. Полученные в итоге математические зависимости позволяют прогнозировать влияния физико-структурных характеристик почвы на энерго-массообмен почвы и турбулентной атмосферы и, как следствие, на формирование климата Земли.

Достоверность научных результатов обеспечивается применением при разработке физико-математических моделей общих законов и уравнений термодинамики и механики сплошных сред. Проведенный сравнительный анализ решений полученных уравнений показывает хорошее соответствие этих результатов в частных случаях с экспериментальными данными.

Личный вклад диссертанта заключается в разработке модели формирования водопропрочной структуры почвы, модели влияния физико-структурных характеристик почвы на теплофизические характеристики почвы и, тем самым, на энерго-массообмен почвы и нижней атмосферы, а также в проведении расчетов теоретических зависимостей, обработке результатов и сравнение их с собственными и литературными экспериментальными данными.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на следующих научных конференциях:

- «Структура и динамика молекулярных систем», Яльчик, 2003 г.;
- «Фундаментальные физические исследования в почвоведении и мелиорации», Москва, 2003 г.;
- «Структура и динамика молекулярных систем», Яльчик, 2004 г.;
- Euro-Conference on Rock Physics and Rock Mechanics, Potsdam, 2004.

Структура и содержание работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованных источников, содержит 120 страниц сквозной нумерации, в том числе 4 таблицы и 31 рисунок; список литературы насчитывает 102 наименований, в том числе публикации автора по теме диссертации – 11 наименований.

Во введении обсуждается актуальность темы, формулируются цель и положения, выносимые на защиту. Приводится обзор работ, имеющих отношение к результатам автора. Дается анализ структуры и содержания диссертации. Необходимо отметить, что по вопросам, о которых идет речь в диссертации, име-

ется обширная литература. В наши задачи не входило подробное изложение основных представлений по термодинамике и физике почв или свойствам почвенной влаги. Тем не менее, необходимо отметить, что все новые результаты этой и остальных глав базируются на известных концепциях. Так, основные результаты по теории осмотической набухающей ячейки опираются на работы Р. И. Злочевской и В. А. Королева. Огромное влияние также оказали работы Л. И. Кульчицкого, Г. Спозито и С. Иваты. В них изложены основные результаты по термодинамике и физической химии почвенной влаги, на которых построены все результаты первой главы книги. Из работ по теории массопереноса в почвах хотелось бы выделить прежде всего известные монографии Т. Маршалла и Дж. Холмса, а также Д. Митчелла. Кроме того, в этих работах содержится обширный экспериментальный материал по основным свойствам почв, сведения по вещественному составу почвы, основные концепции сложных взаимосвязанных явлений при переносе веществ в почвах (coupled processes), и ряд других. Важными являются пионерские экспериментальные исследования Д. Летти и А. Клютте, а также работа К. Норриша по внутрикристаллическому набуханию. В диссертации используются модели многофазного массопереноса, изложенные в книгах и статьях Г. И. Баренблатта, В. М. Ентова, Я. Бэра, кинетики химических реакций в ходе процессов массопереноса (прежде всего работа Д. А. Франк-Каменецкого), теории массопереноса в тонких пленках (работы Б. В. Дерягина и Н. В. Чураева, обобщенные в их совместной монографии). Важную роль играют классические монографии по физике атмосферы, прежде всего А. Х. Хргиана, а также А. Р. Константинова, в которых рассматриваются вопросы тепло- и влагообмена почвы и атмосферы.

Первая глава посвящена вопросам, связанным с термодинамическими и физико-механическими характеристиками почвы и, в частности, почвенной влаги. Основное внимание уделялось нами необходимому уточнению классических результатов по осмотическому равновесию в почвах как ионообменных системах. Были использованы результаты для моделирования физико-механических свойств почв на основе расширенного принципа доннановского равновесия (в смысле его обобщения для ионообменных набухающих систем). Показано, что загрязнение почвы снижает водоудерживающую способность почв.

Первый раздел главы посвящен описанию почв как ионообменных систем, чья способность к набуханию обусловлена наличием электрического заряда

у системы, который компенсируется за счет адсорбции катионов из раствора. Поскольку условия равновесия в таких системах (доннатовское равновесие) должны дополняться условиями электрической нейтральности системы в целом, то мы приходим к новым уравнениям, позволяющим описывать процесс набухания при известных значениях некоторых параметров. Эти системы были нами названы осмотическими ячейками (рис. 1).

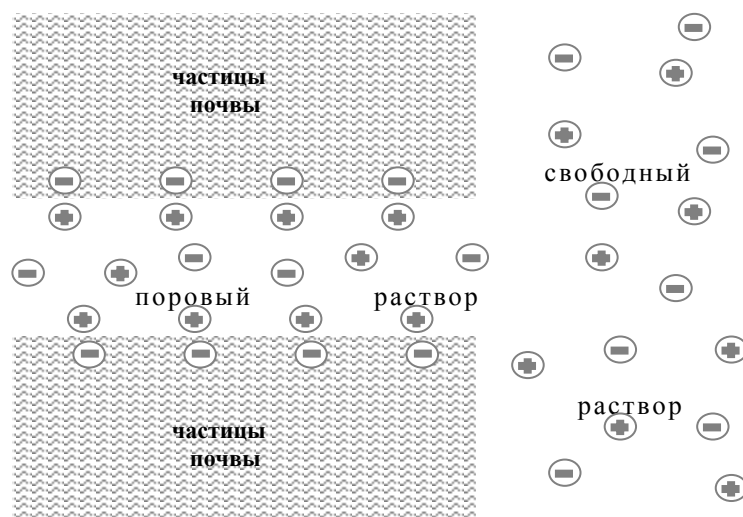


Рис.1. Схема осмотической ячейки, образованной почвенными частицами

Второй раздел главы посвящен решению уравнений равновесия в осмотических ячейках. В частности, было получено решение для уравнения набухания, связывающего давления в растворе и среде и концентраций ионов в растворе и ионообменной системе. Это уравнение позволяет интерпретировать полученные результаты с точки зрения физико-химической механики пористых сред и, таким образом, связать основные параметры физико-химического характера с параметрами, имеющими гидрофизический и теплофизический смысл. В этом смысле полученные результаты перекидывают «смысловой мостик» между термодинамикой почв и механикой почв, которой посвящен второй раздел книги.

Вторая глава содержит основные уравнения механики пористых сред в условиях неполного насыщения влагой, учитывающие эффект от перехода воды из транспортных пор в состав почвенных частиц или обратно (набухание/усадка). Основные уравнения получены на основе обобщения подходов классической фильтрационной консолидации и теории фильтрации в ненасыщенных пористых средах.

Первый раздел посвящен выводу уравнения баланса массы в почвах. Основной результат получен как обобщение результатов для набухающих систем в условиях полного насыщения на системы, находящиеся в условиях неполного насыщения водой.

$$-\partial[m(1-s)]/\partial t + [1-m(1-s)]\partial\theta/\partial t + \operatorname{div}\vec{q} = 0. \quad (1)$$

Здесь θ – общая усадка почвы, m – пористость, s – водонасыщенность, \vec{q} – скорость фильтрации. Результирующее уравнение имеет ясный физический смысл, допускает сведение к известным частным случаям и в этом смысле корректно.

Второй раздел главы посвящен уравнению баланса импульса в локально-равновесной форме (уравнения механического равновесия) для почв. Уравнение позволяет использовать результаты первой главы, связывающие основные параметры набухающих систем с приложенной к ним механической нагрузкой. Таким образом, удастся не только корректно ввести эффективные напряжения для набухающей системы в условиях неполного влагонасыщения, но и установить взаимосвязь этой величины с осмотическим давлением в набухающей системе. Из условия механического равновесия и решения уравнения (1) получена зависимость плотности почвы от нагрузки, вид которой приводится на рис. 2.

Третий раздел главы посвящен фильтрации в почвах. Содержание раздела достаточно традиционно и посвящено обзору основных закономерностей ненасыщенной фильтрации (см. результаты П.Я.Кочиной, Ричардса, Филиппа и др.).

Четвертый раздел главы посвящен собственно процессу набухания/усадки почв и грунтов. В основу положено уравнение кинетики набухания/усадки, основанное на пропорциональности силы, вызвавшей поток жидкости при набухании, самому потоку. Такой подход является в этом смысле традиционным при моделировании неравновесных процессов, к коим относится и изучаемый нами процесс набухания/усадки почв. Здесь получено простейшее решение задачи набухания слоя грунта под постоянной нагрузкой для стационарного фильтрационного потока.

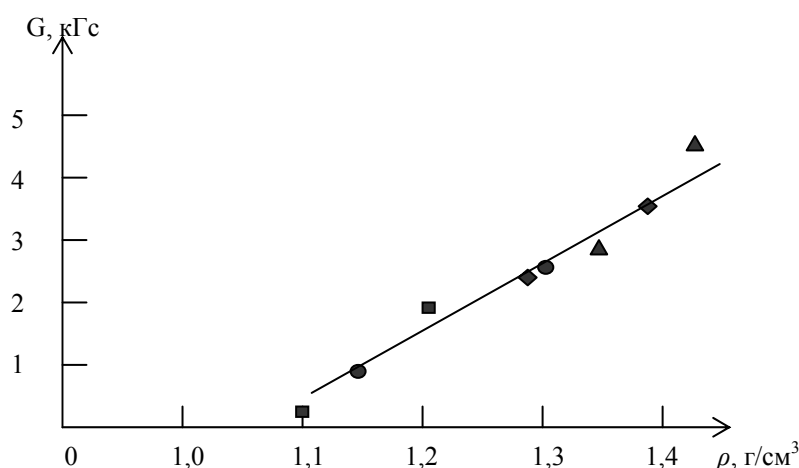


Рис. 2. Зависимость плотности почв от удельного давления. Прямая линия – результат расчетных данных. Точками обозначены данные для ширины шин трактора:

150 - 600 мм - ■ 15 - 30 мм - ●
 12 - 38 мм - ◆ 10 - 42 мм - ▲

Проведено сравнение результатов расчетов по изменению усадки и пористости среды с результатами эксперимента и доказано хорошее согласие расчетных и опытных данных. Кроме того, предложена модель по выявлению связи между динамикой процесса набухания/усадки и агрегатным составом почвы. Установлено, что максимально быстрому впитыванию влаги слоем почвы или максимально быстрой сушке соответствует структурирование почвы в агрегаты строго определенного размера. Это позволяет подойти к решению проблемы о распаде первоначально гомогенной почвенной массы в процессе сушки на агрегаты размера, определенного для каждого типа почв, а также проследить влияние механического воздействия на почву, снижающего одну из важнейших характеристик почвенного покрова - величину водоудерживающей способности.

Третья глава посвящена вопросам моделирования процесса массопереноса в почве и буферной функции почвы при загрязнении гидросферы.

В первом разделе главы рассмотрена задача о конвективном массопереносе пассивной в химическом отношении примеси фильтрационным потоком. Получено решение задачи о хранилище загрязнений, получены соотношения для коэффициентов распределения примеси в почве.

Во втором разделе главы рассмотрен процесс диффузии в почве. Так же, как для процесса диффузии электролитов в глинах, установлены нелинейные

уравнения для диффузии в почве. Получены выражения для эффективного коэффициента диффузии в почве. Соотношение

$$D_{f,s} = D \left(m_p + m_c \frac{\sqrt{C}}{\sqrt{C+1}} \right) \quad (2)$$

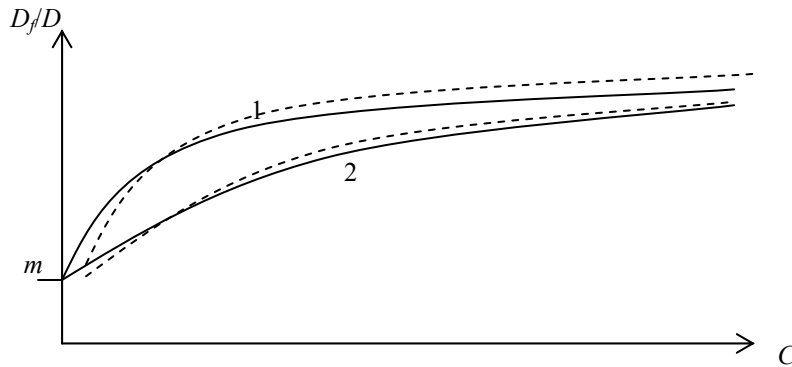


Рис.3. Зависимость коэффициента диффузии от концентрации загрязнения: 1 – набухающая почва, 2 – ненабухающая почва; штриховые линии – экспериментальные данные

можно рассматривать как эффективный коэффициент диффузии раствора в почве в зависимости от концентрации примеси (загрязнителя) в растворе C . Соответствующее выражение для случая ненабухающей почвы имеет вид

$$D_{f,u-s} = D \left(m_p + m_c \frac{C}{\sqrt{e_h^2 + C^2}} \right). \quad (3)$$

Вид кривых зависимости коэффициента диффузии примеси в растворе от концентрации примеси находится в хорошем согласии с данными экспериментов (рис. 3).

В третьем разделе главы рассматриваются закономерности изменения основных электрохимических параметров почвы в зависимости от концентрации пассивной химической примеси в почве. Построена теоретическая модель электрохимических свойств набухающих и ненабухающих почв на базе представления об осмотической ячейке. Далее, проведено сравнение расчетных данных с соответствующими данными двух экспериментальных работ (известные работы Д. Летти и А. Клютте) по этому вопросу.

Четвертая глава работы посвящена изучению и моделированию физико-структурных характеристик почвы как границы между атмосферой и гидросферой.

Первый раздел главы посвящен собственно вопросу об агрегировании почвенной массы. На основании экспериментальных результатов, приведенных в работе группы авторов (*Кринари и др., 2003*) разработаны основные предпосылки для построения математической модели процесса агрегатообразования в почвах.

Во втором разделе проведена реализация модели наиболее простого сценария процесса агрегатообразования. Полученные данные качественно согласуются с основными характеристиками такого процесса, выявленными экспериментально. Исследован процесс массопереноса в биокосных системах и его приложения к процессу почвообразования.

Третий раздел главы посвящен анализу факторов, стабилизирующих органическое вещество почв. Постановка следует из анализа результатов предыдущей главы. Показано, что при определенных (очевидных) предположениях о характере протекания процессов взаимодействия органического вещества почвы с минеральной матрицей процесс почвообразования характеризуется параметрами, отвечающими механическому равновесию (устойчивости) образующей органно-минеральной структуры.

Пятая глава посвящена вопросам о влиянии физико-структурных характеристик почвы на процессы теплообмена и влагообмена почвы и нижней (турбулентной) атмосферы.

В первом разделе главы построены основные соотношения для связи физико-структурных характеристик почвы с основными теплофизическими параметрами почвы. Соответствующее выражение для основного параметра – теплоемкости почвы – имеет вид

$$c_V = c_{Vw}s \left[\frac{m_{ef}}{1+s+s^2} + 1 - \frac{V_s}{V_0} \right] + c_{Vs} \frac{V_s}{V_0}. \quad (4)$$

Здесь c_{Vw} – теплоемкость воды; s – водонасыщенность почвы; c_{Vs} – теплоемкость твердого почвенного материала; V_s , V_0 – объемы твердого материала и элемента всей среды соответственно, а также введено обозначение для эффективной пористости

$$m_{ef} = \frac{0,5RTe}{s_0 p_0 V_0}. \quad (5)$$

Во втором разделе главы исследуется влияние основных физико-структурных характеристик почвы на суточный и годовой ход температуры поверхности почвы и радиационный обмен почвы и атмосферы. Получено выражение для основного управляющего суточным и годовым ходом температуры поверхности почвы параметра процесса – коэффициента теплоусвоения M

$$M = M_0 \left[\sqrt{\delta_t \delta_m} \varphi(s) + \frac{V_s}{V_0} \right] . \quad (6)$$

Здесь используется обозначение

$$\varphi(s) = \frac{m_{ef}}{1 + s + s^2} . \quad (7)$$

Анализ полученного уравнения показал, что чем больше в составе почвы находится обеспечивающей набухание компоненты (глинистые минералы, почвенная органика), тем меньше амплитуда суточных и годовых колебаний температуры поверхности почвы.

В третьем разделе главы исследуется влияние физико-структурных характеристик почвы на процесс испарения почвенной влаги, приводится оценка для потоков испаряющейся влаги по капиллярам и по тонким порам почвенной матрицы (осмотическое перемещение влаги):

$$J_f / J_w = \rho_f K_s E_w / \rho_w D \quad (8)$$

Установлено, что полученные нами уравнения для основных физико-структурных характеристик почвы дают правильную оценку процесса испарения почвенной влаги по порам и вследствие пленочного течения почвенной влаги.

В четвертом разделе главы исследуется влияние физико-структурных характеристик почвы на теплообмен и влагообмен почвы и турбулентной атмосферы, дается анализ глобальных последствий вследствие изменений физико-структурных характеристик почвы, вызванных техногенными причинами.

В заключении сформулированы основные выводы, полученные в диссертационной работе:

1. выведены уравнения физико-химической механики почвы, из анализа которых получены зависимости плотности набухающей почвы от приложенной нагрузки и влажности, определяющие энерго-массообмен почвы и атмосферы, а также выражение для характерного размера почвенного агрегата;

2. получены аналитические выражения для коэффициента распределения примеси в почвенной влаге и для зависимости коэффициентов диффузии и электрохимических параметров почвы от концентрации раствора;
3. выведены уравнения, описывающие формирование почвенного профиля и водопрочной агрегатной структуры;
4. установлены связи теплофизических параметров почвы с основными физико-структурными характеристиками почвы, прежде всего с влажностью и со способностью почвы к набуханию;
5. получена зависимость коэффициента теплоусвоения от основных физико-структурных характеристик почвы, и их влияние на суточный и годовой ход температуры почвы, а также на энерго-массообмен между почвой и турбулентной атмосферой в целом.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Храмченков М.Г. Физико-химия и механика процессов набухания в почвах / М.Г. Храмченков, Р.Х. Храмченкова // Фундаментальные физические исследования в почвоведении и мелиорации: сб. ст. – М.: Изд-во МГУ, 2003. – С. 260–262.
2. Кринари Г.А. Динамика и структурные пределы формирования надмолекулярных органно-минеральных комплексов. / Г.А. Кринари, М.Г. Храмченков, Р.Х. Храмченкова, А.А. Шинкарев, К.Г. Гиниятуллин // Структура и динамика молекулярных систем: сб. ст. – Казань: Изд-во КГУ, 2003. – Часть 3. – С. 110–116.
3. Кринари Г.А. Минералогические и реологические подходы к агрегации почв. / Г.А. Кринари, М.Г. Храмченков, Р.Х. Храмченкова, А.А. Шинкарев, К.Г. Гиниятуллин // Фундаментальные физические исследования в почвоведении и мелиорации: сб. ст. – М.: Изд-во МГУ, 2003. – С. 19–24.
4. Храмченков М.Г. Математическая модель усадки набухающего почвенного слоя / М.Г. Храмченков, Р.Х. Храмченкова, А.Н. Чекалин // Вопросы атомной науки и техники, сер. Математическое моделирование физических процессов. – 2004. – № 3. – С. 72– 5.
5. Лыгина Т.З. Физико-химические аспекты формирования и роль глино-металло-органического комплекса в процессе почвенного агрегатообразования / Т.З. Лыгина, Т.А. Романова, Р.Х. Храмченкова, М.Г. Храмченков // Структура и

динамика молекулярных систем: сб. ст. – Казань: Изд-во КГУ, 2004. – Часть 1. – С. 372–377.

6. Khramchenkov M.G. Swelling's model: non-elasticity and scaling / M.G. Khramchenkov, R.Kh. Khramchenkova // EURO Conference on Rock Physics and Geomechanics, September 20-23, 2004.: Abs. – Potsdam, 2004. – p.72–74.

7. Храменков М.Г. Введение в физико-химическую механику почв / М.Г. Храменков, Р.Х. Храменкова – Казань: Изд-во Казан. мат. об-ва, 2005. – 100 с.

8. Лыгина Т.З. Электрохимические свойства почв и грунтов / Т.З. Лыгина, Р.Х. Храменкова, М.Г. Храменков // Разведка и охрана недр. – 2005. – №8. – С. 50–54.

9. Храменкова Р.Х. Влияние физико-структурных характеристик почвы на энерго-массообмен почвы и нижней атмосферы / Р.Х. Храменкова, М.Г. Храменков, А.Н. Фахрутдинова. – Препринт ПМФ – Казань: Изд-во Казан. мат-го об-ва, 2006. – 01. – 25с.

10. Храменков М.Г. Теоретические основы гидрофизики набухающих почв / М.Г. Храменков, Р.Х. Храменкова // Георесурсы. – 2006. – №1 (18), – С. 17–20.

11. Храменкова Р.Х. Гидрофизические свойства и атмосферная функция почв / Р.Х. Храменкова, М.Г. Храменков, А.Н. Фахрутдинова, А.Н. Чекалин // Вопросы атомной науки и техники, сер. Математическое моделирование физических процессов. – 2006, – №2 (в печати).